# บทที่ 5
# อภิปรายผล สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

## 5.1 อภิปรายผลการวิจัย

การศึกษาในครั้งนี้ทำในช่วงเดือนมกราคมถึงสิงหาคมหรือฤดูหนาวตอนปลาย ผ่านฤดูร้อน จนถึงฤดูฝนตอนต้นมีอุณหภูมิอากาศในช่วง 24.0 – 32.9 องศาเซลเซียส อากาศจะหนาวอยู่ในช่วงเดือนแรกเท่านั้น (24.0 - 30.6 องศาเซลเซียส) ต่อมาอากาศจะอบอุ่นขึ้นจนร้อนมากในเดือนมีนาคม และเมษายนหรือคือเดือนที่สองและสามในการเลี้ยง มีอุณหภูมิอากาศสูงสุดในเดือนมีนาคม (32.9 องศาเซลเซียส) ท้องฟ้าแจ่มใสมาก และมีเมฆน้อย ส่วนในเดือนพฤษภาคม มิถุนายน และกรกฎาคม หรือเดือนที่สี่ ห้า และหกของการเลี้ยง อุณหภูมิอากาศจะเริ่มต่ำลงเนื่องจากเริ่มมีฝนตก บรรยากาศครึ้ม มีเมฆมาก ความเค็มน้ำเริ่มลดลงจาก 31.6 พีพีที เหลือ 28.4 พีพีที และในเดือนกรกฎาคมหรือเดือนที่หก น้ำทะเลที่ใช้เลี้ยงเริ่มมีความเค็มลดลงอย่างมากเนื่องจากผลกระทบของน้ำฝนอยู่ที่ประมาณ 17.7 - 28.7 พีพีที ซึ่งการลดลงของความเค็มน้ำทะเลอาจจะมีผลต่อการทดลองในเดือนสุดท้ายเท่านั้น ส่วนผลของฤดูกาลเนื่องจากเลี้ยงในฤดูร้อนมีอุณหภูมิอากาศสูง (เฉลี่ยทั้งหมดเท่ากับ 29.35 องศาเซลเซียส) หอยหวานจึงอาจจะมีอัตรากระบวนการเมตาบอลิซึมสมบูรณ์ที่สุด ผลกระทบของอากาศเกิดขึ้นในช่วงเดือนแรกเท่านั้นที่อุณหภูมิอากาศยังคงต่ำอยู่ในช่วง 24.0-30.6 องศาเซลเซียส

การทดลองให้อาหารผสมเสริมแคลเซียมและฟอสฟอรัสระดับต่างๆในเวลาหกเดือนจากความยาวเปลือกเริ่มต้น 1.45 $\pm$ 0.06 เซนติเมตร พบว่ามีความยาวเปลือกสุดท้ายเท่ากับ 2.76 $\pm$ 0.13 เซนติเมตร อัตราการเจริญเติบโตโดยความยาวเปลือกต่อวัน (DISL) เท่ากับ 0.007 เซนติเมตรต่อวัน ความกว้างเปลือกเริ่มต้นในการทดลองนี้เท่ากับ 0.98 $\pm$ 0.13 เซนติเมตร ความกว้างเปลือกสุดท้ายเท่ากับ 1.86 $\pm$ 0.08 เซนติเมตร มีอัตราการเจริญเติบโตโดยความกว้างเปลือกต่อวันเท่ากับ 0.005 เซนติเมตรต่อวัน หอยหวานมีน้ำหนักเริ่มต้นเท่ากับ 0.61 $\pm$ 0.07 กรัม เลี้ยงได้น้ำหนักสุดท้ายเท่ากับ 4.26 $\pm$ 0.51 กรัม คิดเป็นอัตราการเจริญเติบโตโดยน้ำหนักต่อวันเท่ากับ 0.020 กรัมต่อวัน ค่า Weight Gain Rate เท่ากับ 604 $\pm$ 82 อัตราการแลกเนื้อ (FCR) เท่ากับ 2.31$\pm$ 0.32 อัตราการรอดเท่ากับ 91.72 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความยาวเปลือกสุดท้าย อัตราการเจริญเติบโตโดยความยาวเปลือกต่อวัน น้ำหนักตัวสุดท้าย อัตราการเจริญเติบโตโดยน้ำหนักตัวต่อวัน และอัตราการรอด ต่ำกว่าการเลี้ยงหอยหวานของคุณนิลนาจ ชัยธนาวิสุทธิ์ และคุณอนุตร กฤษณะพันธุ (นิลนาจ และศิรุษา, 2545) และของคุณลือชัย ดรุณชู และคุณเกียรติศักดิ์ เสนะวีณิน (ลือชัย และเกียรติศักดิ์, 2544) ความกว้างเปลือกใกล้เคียงกัน แต่มีค่าอัตราการแลกเนื้อสูงกว่างานของนิลนาจ ชัยธนาวิสุทธิ์ และอนุตร กฤษณะพันธุ แต่ต่ำกว่างานของลือชัย ดรุณชู และเกียรติศักดิ์ เสนะวีณิน โดยนิลนาจ ชัยธนาวิสุทธิ์

และอนุตร กฤษณะพันธุ เลี้ยงหอยหวานในระบบน้ำทะเลหมุนเวียนด้วยบ่อซีเมนต์ ความลึกน้ำ 1 เมตร ใช้เศษปะการังและเปลือกหอยนางรมเป็นตัวกรองชีวภาพ เปลี่ยนน้ำทุกสองเดือน เลี้ยงด้วยเนื้อปลาทูสดระยะเวลา 6 เดือน มีขนาดความยาวเปลือกสุดท้ายเฉลี่ยเท่ากับ 3.16 เซนติเมตร มีอัตราการเจริญเติบโตโดยความยาวเปลือกต่อวันเท่ากับ 0.010 เซนติเมตรต่อวัน น้ำหนักตัวสุดท้ายเฉลี่ยเท่ากับ 5.98 กรัม อัตราการเจริญเติบโตโดยน้ำหนักตัวต่อวันเท่ากับ 0.031 กรัมต่อวัน อัตราการแลกเนื้อเท่ากับ 2.0 อัตราการรอดตายสุดท้าย 95.4 เปอร์เซ็นต์ (นิลนาจ และศิรุษา, 2545) ส่วนการทดลองเลี้ยงหอยหวานในการทดลองของลือชัย ดรุณชู และเกียรติศักดิ์ เสนะวีณิน ที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่งจันทบุรี (ลือชัย และเกียรติศักดิ์, 2544) ที่เลี้ยงในตะกร้าพลาสติกเช่นเดียวกัน ให้ปลาทูสดเป็นอาหาร ใช้เวลาเลี้ยงเจ็ดเดือน มีอัตราการเจริญเติบโตโดยความยาวเปลือกต่อวันเท่ากับ 0.008 เซนติเมตรต่อวัน อัตราการเจริญเติบโตโดยความยาวเปลือกต่อวันเท่ากับ 0.005 เซนติเมตรต่อวัน การเจริญเติบโตโดยน้ำหนัก 0.058 กรัมต่อวัน มีอัตราการแลกเนื้อเฉลี่ยเท่ากับ 3.26 $\pm$ 0.25 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อัตราการรอดเฉลี่ย 93.90 $\pm$ 2.30 เปอร์เซ็นต์ อาจเป็นไปได้ว่าการเลี้ยงหอยหวานด้วยอาหารเสริมแคลเซียม และ ฟอสฟอรัสในครั้งนี้มีการเจริญเติบโตต่ำเนื่องจากน้ำทะเลที่ใช้ ค่าด่างรวม และสัดส่วนแคลเซียมต่ำกว่าน้ำทะเลปรกติ คุณภาพและรูปแบบที่เหมาะสมในการกินอาหารของหอยหวาน และไม่มีระบบตัวกรองชีวภาพเช่น เปลือกหอยนางรม หรือเศษปะการังที่ไม่ใช้เพื่อไม่ให้แคลเซียมไปมีผลต่อระดับแคลเซียมในหน่วยการทดลอง

การศึกษาในครั้งนี้พบว่าระดับแคลเซียมให้ผลการเติบโตแตกต่างกัน โดยหอยหวานที่ได้กินอาหารระดับ 1% และ 7% การเติบโตด้านความยาวเปลือกดีที่สุด ซึ่งดีกว่าหอยหวานที่ได้รับอาหารระดับแคลเซียม 4 % นอกจากนี้แคลเซียมมีผลต่อการเติบโตด้านน้ำหนักตัวแตกต่างกัน โดยหอยหวานที่ได้กินอาหารระดับ 1% และ 7 % มีน้ำหนักตัวมากที่สุดใกล้เคียงกัน หนักกว่าหอยหวานที่ได้รับแคลเซียมระดับ 4% แสดงให้ทราบว่าระดับแคลเซียม 4% ไม่เหมาะกับการใช้เลี้ยงหอยหวาน แต่แคลเซียมไม่มีผลต่อการเติบโตด้านกว้างเปลือก

ระดับฟอสฟอรัสให้ผลการเติบโตแตกต่างกัน โดยหอยหวานที่ได้กินอาหารระดับ 1% การเติบโตด้านความยาวเปลือกดีที่สุด ซึ่งดีกว่าหอยหวานที่ได้กินอาหารระดับฟอสเฟต 3% และ 5% นอกจากนี้ฟอสฟอรัสมีผลต่อการเติบโตด้านน้ำหนักตัวแตกต่างกัน โดยหอยหวานที่ได้กินอาหารระดับ 1% มากกว่าน้ำหนักตัวหอยหวานที่ได้กินอาหารระดับ 3% และ 5% แสดงว่าฟอสฟอรัสระดับต่ำ 1 % เหมาะสมกับการใช้เลี้ยงหอยหวาน แต่ฟอสฟอรัสไม่มีผลต่อการเติบโตด้านความกว้างเปลือก

การเปรียบเทียบอาหารทุกสูตรมีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกันโดยอาหารผสมเสริมแคลเซียม 4% และฟอสเฟต 3% และ อาหารผสมที่เสริมแคลเซียม 4% และฟอสเฟต 5% มีการแตกตัวและละลายน้ำใช้เวลาสูงกว่าอาหารสูตรที่เหลือ ซึ่งอาหารผสมที่เสริมแคลเซียม 4% และฟอสเฟต 3% กับอาหารเสริมแคลเซียม 4% และฟอสเฟต 5% จะมีอัตราการเจริญโดยน้ำหนักต่ำที่สุดเท่ากับ 432.96% และ 560.16% ตามลำดับ โดยอาหารผสมที่เสริมฟอสเฟต 1% จะมีอัตราการเจริญโดยน้ำหนักสูงที่สุดในทุกระดับของการเสริมแคลเซียม คือ Ca1% : P1% (648.37%), Ca4% : P1% (574.29%) และ Ca7% : P1% (711.93%) โดยทุกการทดลองมีอัตราการรอดตายสุดท้ายเกิน 90% (91.11% – 95.55%) สำหรับอัตราการแลกเนื้อของหอยหวานในทุกการทดลองของอาหารผสมเสริมแคลเซียมและฟอสเฟตมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยอาหารผสมที่เสริมแคลเซียม 4% และฟอสเฟต 3% กับอาหารเสริมแคลเซียม 4% และฟอสเฟต 5% จะมีอัตราการแลกเนื้อต่ำที่สุดเท่ากับ 2.56 และ 3.03 ตามลำดับ การเติบโตของหอยหวานทุกสูตรอาหารสำเร็จมีการเติบโตด้านความยาว ความกว้างเปลือก และน้ำหนักต่ำกว่าหอยที่กินเนื้อปลาอาจ ซึ่งเป็นไปได้ว่าอาหารที่ทำขึ้นยังขาดสารอาหารที่สำคัญบางตัวและอาจมีรูปแบบที่ยังไม่เหมาะสมต่อการกินอาหารเท่าปลาสด เมื่อเปรียบเทียบเฉพาะสูตรอาหารผสม สูตร Ca : P เท่ากับ 7 : 1 มีการเติบโตดีที่สุด และสูตร Ca : P เท่ากับ 4 : 1 และ Ca : P เท่ากับ 4 : 5 มีการเติบโตต่ำกว่าสูตรอื่น ซึ่งอภิปรายได้ว่าระดับฟอสเฟตสูงให้ผลการเติบโตต่ำ เนื่องจากฟอสเฟตในน้ำมีผลยับยั้งการเติบโตก่อนที่ได้รับเข้าไปในร่างกาย

จากการนำค่าความยาวเปลือกและน้ำหนักตัวของหอยหวานที่ได้กินอาหารผสมแต่ละสูตรเสริมแคลเซียม และฟอสฟอรัสซึ่งวัดผลการเติบโตทุก 1 เดือน ตลอดระยะเวลา 6 เดือน มาพลอตกราฟ พบว่าน้ำหนักตัวแปรผันตรงกับความยาวเปลือกตัวเดียวกัน ณ หอยอายุและเวลาใดๆ หรือเท่ากับ $W \alpha L^3$ และมีความสัมพันธ์ในเชิงสมการเอกซ์โพเนนเชียล โดยค่า intercept ในการทดลองนี้มีค่าเฉลี่ย -3.78756 และ ค่า slope เท่ากับ 2.78563 ดังนั้นได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความยาวเปลือกกับน้ำหนักตัว ณ เวลาใดๆ เท่ากับ

$$\log W = -3.78756 + 2.78563 (\log L)$$

หรือ $$W = 0.00016 * (L^{2.78563})$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวเปลือกกับน้ำหนักตัวนี้ใกล้เคียงกับหอย Manila clams (*Tapes philippinarum*) ซึ่งเป็นหอยสองฝาที่มีถิ่นอาศัยในแถบประเทศฟิลิปปินส์ (Bradbury et al., 2005) ที่มีความสัมพันธ์ดังสมการ

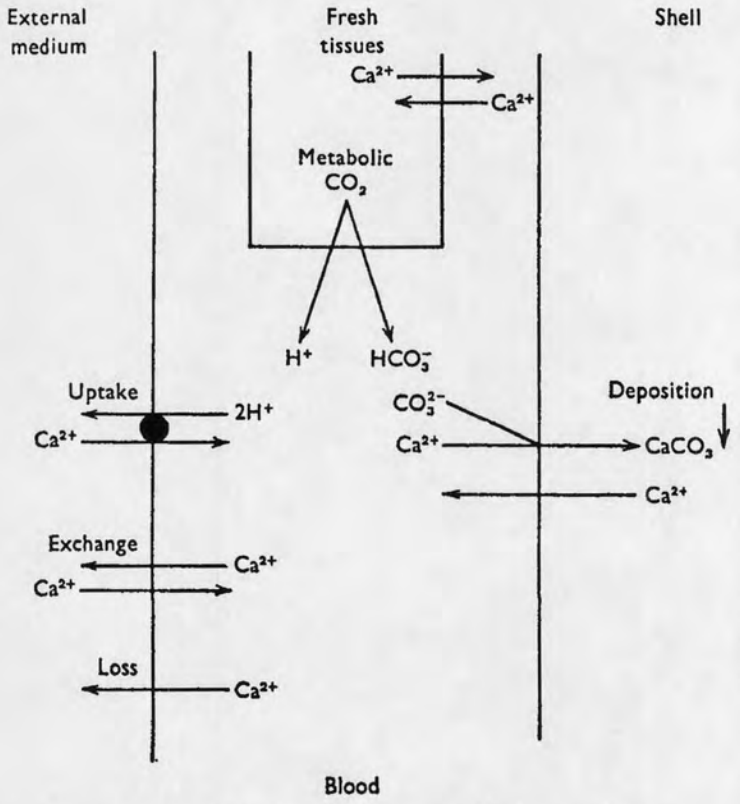
$$W = 0.00029 * (L^{2.9600})$$

ในเรื่องการกินอาหารจากการสังเกตหอยหวานกินอาหารในสามเดือนแรกปริมาณมาก และออกมาจากทรายหลายตัวในทุกสูตรอาหาร แต่จากการสังเกตในสามเดือนหลังเริ่มมีหอยหวานที่ไม่ออกมากินอาหารในบางสูตรคืออาหารผสมสูตรเสริมแคลเซียม 4% กับฟอสฟอรัส 3% และแคลเซียม 4% กับฟอสฟอรัส 5% นั้นอาจเป็นไปได้ว่าอาหารผสมมีลักษณะภายนอกแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยอาหารสูตรแคลเซียม 4% ฟอสฟอรัส 3 % และ แคลเซียม 4% กับฟอสฟอรัส 5% มีลักษณะภายนอกคล้ายกันมากและแตกต่างจากอาหารสูตรอื่นๆคือมีสีน้ำตาลปานกลางมีความแข็งหลังจากแช่น้ำ 2 -3 ชั่วโมง สีจะเปลี่ยนไปเป็นสีเทา และจะคงตัวอยู่ในน้ำได้นาน แต่หอยกินอาหารสองสูตรนี้ปริมาณน้อยลง อีกประการหนึ่งคือเมื่อทรายเริ่มมีการสะสมของเสียจนมีสีเทาอมดำ และมีกลิ่นเหม็น ในสภาวะนี้หอยหวานจำนวนจะไม่ออกมากินอาหารทำให้ค่าอัตราการแลกเนื้อต่ำ ส่วนในอาหารสูตรอื่นที่เหลือนั้นหอยหวานยังคงออกมากินตลอดระยะเวลาการเลี้ยงหกเดือน แต่ปริมาณที่กินเริ่มลดลงในสูตรแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 1 : 3, 1 : 5, 4 : 3, 4 : 5, 7 : 3, และ 7 : 5 ยกเว้นอาหารสูตร 1 : 1, 4 : 1 และ 7 : 1 หอยหวานยังคงกินอาหารในปริมาณมาก จำนวนตัวหอยกินอาหารและปริมาณอาหารที่หอยกินอาหารแตกต่างกันค่อนข้างมาก ทำให้ค่าอัตราการแลกเนื้อแตกต่างกัน

การวัดอัตราการแลกเนื้อค่อนข้างทำได้ยากเนื่องจากการใช้ฝาหอยตลับ ซึ่งใช้ทั้งสองฝาบรรจุอาหารและวางบนทรายนั้น อาหารที่ให้หอยกินเป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง จนถึงการเก็บอาหาร พบว่า อาหารเกือบทุกสูตรมีบางส่วนละลายในน้ำไป และส่วนที่เหลือก็แตกตัวออกจนมีลักษณะคล้ายเม็ดกรวดทราย แต่แตกต่างกันที่มีความนิ่ม เมื่อพยายามนำอาหารขึ้นจากน้ำอย่างพิถีพิถันที่สุดและหยุดการให้อากาศ พบว่าอาหารบางส่วนก็หลุดออกจากเปลือกหอยเนื่องจากแรงดึงดูดของน้ำและคลื่นภายในมวลน้ำ การสูญเสียปริมาณอาหารลงไปในน้ำมีส่วนทำให้การคำนวณค่าในการทดลองครั้งนี้ต่ำกว่าความเป็นจริง และได้ค่าที่แตกต่างกันมาก

ตลอดระยะเวลาการเลี้ยงและระหว่างการเปลี่ยนถ่ายน้ำภายในเวลาหนึ่งเดือน ปรากฏผลการลดลงของแคลเซียมจาก 120 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ในทุกหน่วยการทดลองซึ่งทำให้หอยหวานเกิดอาการเปลือกลอกเกือบทุกตัวในทุกสูตรอาหาร เนื่องจากว่าระดับแคลเซียมในน้ำซึ่งมีสัดส่วนมากในระบบลดลงในเวลาหนึ่งเดือน ซึ่งความแตกต่างของระดับแคลเซียมในอาหารเสริมมีน้อยเกินไปที่จะทำให้ระดับแคลเซียมในน้ำเปลี่ยนแปลง แต่ยังไม่มีผลปรากฏอย่างชัดเจนว่าระดับแคลเซียมในการทดลองครั้งนี้เป็นระดับที่ต่ำเกินไปหรือหอยไม่ต้องการแคลเซียมจากอาหารในการเติบโต ซึ่งสัตว์น้ำจำพวกหอยสามารถดูดซึมแคลเซียมจากน้ำไปใช้ประโยชน์ได้ดีกว่าจากอาหารด้วย และแคลเซียมมีส่วนในการเติบโตไม่มากนัก หอยต้องการแคลเซียมจากอาหารน้อยมาก แม้ว่าจะต้องการแคลเซียมในการสร้างเปลือกหรือโครงร่างซึ่งเป็น

ลักษณะเด่นของหอยเปลือกเดียวโดยเฉพาะ แต่จะได้รับแคลเซียมโดยการดูดซึมทางผิวหนังจากน้ำภายนอกร่างกาย ดูดซึมจากน้ำที่ผ่านเหงือก หรือโดยการดื่มเข้าไป (Tan et al., 2000 อ้างถึง Hilton. 1989) โดยเฉพาะสัตว์จำพวกหอยสามารถดูดซึมแคลเซียมจากน้ำทะเลได้โดยตรง (Tan et al., 2000 อ้างถึง Coote et al., 1996) โดยหอยเปลือกเดียวน้ำจืดบางชนิดเช่น *Limnaea stagnalis* จะมีการดูดซึมแคลเซียมในรูปแคลเซียมไอออน ($Ca^{2+}$) ผ่านทางเปลือกเข้าไปทางผิวหนังด้านนอก (epidermis) แคลเซียมในรูปแคลเซียมไอออนในเนื้อหรือเปลือกและแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกจะเคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่กระแสเลือด แบบ Passive transport แคลเซียมจะแตกตัวอยู่ในรูปของ $CO_3^{2-}$ และ $Ca^{2+}$ สามารถเข้าออกสู่เนื้อเยื่อต่างๆ (wet tissue) และexternal medium ต่อไปได้ (Greenaway, 1971) ดังรูปที่ 10




**รูปที่ 10** การเคลื่อนที่ของแคลเซียมในร่างกายของสัตว์กลุ่มหอยฝาเดียว

ที่มา ; Greenaway, 1971

จากรายงานการวิจัยในสัตว์น้ำชนิดอื่นๆ พบว่าอาหารที่มีระดับแคลเซียมสูงเกินไปจะมีผลเพิ่มอัตราการตายและลดอัตราการเติบโตในกุ้งขาว *Penaeus vannamei* (Tan et al., 2000) Porn-Ngam et al. (1993) พบว่าการดูดซึมฟอสฟอรัสลดลงเมื่อระดับแคลเซียมสูงขึ้นในอาหารปลาคาร์พและปลา rainbow trout และ Hincks and Mackie (1997) พบว่าหอย Zebra Mussel (*Dreissena polymorpha*) มีอัตราการเติบโตสูงที่สุดในน้ำที่มีระดับแคลเซียมคาร์บอเนต 32 มิลลิกรัมแคลเซียมต่อลิตร แต่แคลเซียมระดับต่ำมีผลต่ออัตราการตายของพ่อแม่พันธุ์หอยโดยจะมีการเติบโตลดลง ในน้ำที่มีระดับแคลเซียมน้อยกว่า 8.5 มิลลิกรัมแคลเซียมต่อลิตร อย่างไรก็ตาม Coote et al. (1996) พบว่าหอยเป๋าฮื้อ greenlip abalone (*Haliotis laevigata*) ต้องการแคลเซียมระดับต่ำจากอาหารคือต่ำกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์ แต่ต้องการฟอสฟอรัสระดับสูงกว่า 0.7 เปอร์เซ็นต์ ในการเติบโต นอกจากนี้ Tan et al. (2000) รายงานว่าในการเลี้ยงหอยเป๋าฮื้อพบว่าระดับแคลเซียมในอาหารไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับสัดส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสที่หอยเป๋าฮื้อต้องการอยู่ในช่วง 0.1 : 1 ถึง 9.0 : 1 สัตว์น้ำเกือบทุกชนิดต้องการฟอสฟอรัสในอาหารเพื่อนำไปเป็นส่วนประกอบของเปลือกเช่นเดียวกับแคลเซียม นอกจากนี้ฟอสฟอรัสที่พบในเลือดและเนื้อเยื่อจะนำมาใช้ในกระบวนการเมทาบอลิซึมที่สำคัญของร่างกายคือเป็นองค์ประกอบของฟอสโฟลิปิดทำให้เยื่อเซลล์คงตัว เป็นองค์ประกอบของเอนไซม์ที่จำเป็นในร่างกาย เป็นสารอิเลกโทรไลต์หรือสารบัฟเฟอร์ภายในเซลล์ ทำหน้าที่ควบคุมสมดุลของกรดและด่างทำให้มีสภาพเป็นกลาง เป็นองค์ประกอบของ ATP ซึ่งมีหน้าที่ถ่ายทอดพลังงานที่ได้จากการย่อยสลายโปรตีน ไขมันและคาร์โบไฮเดรต เป็นองค์ประกอบของ DNA และ RNA ซึ่งมีหน้าที่ควบคุมการถ่ายทอดพันธุกรรม การสังเคราะห์โปรตีนและการสืบพันธุ์ สัตว์น้ำมีความสามารถการดูดซึมฟอสฟอรัสจากน้ำได้เช่นเดียวกับการดูดซึมแคลเซียม แต่สัตว์น้ำดูดซึมฟอสฟอรัสจากน้ำได้ในอัตราที่ต่ำกว่าการดูดซึมแคลเซียมมีสาเหตุมาจากฟอสฟอรัสในน้ำมีค่าต่ำมาก ทำให้สัตว์น้ำดูดซึมเข้ามาไม่เพียงพอแก่ความต้องการของร่างกาย นอกจากนี้สัตว์น้ำยังมีความต้องการฟอสฟอรัสจากอาหารในปริมาณสูงดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องใส่ฟอสฟอรัสในอาหารเพื่อให้เพียงพอแก่ความต้องการของสัตว์น้ำ ความต้องการฟอสฟอรัสของสัตว์น้ำแตกต่างกันในแต่ละชนิดซึ่งอยู่ในช่วง 0.45 - 1.5 เปอร์เซ็นต์ (Tan et al., 2000 อ้างถึง Coote et al., 1996) Tan et al. (2000) รายงานว่าหอยเป๋าฮื้อเติบโตดีที่สุดที่ฟอสฟอรัสระดับสูง 1.15 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหอยจะมีการเติบโตลดลง 5 เปอร์เซ็นต์ ในระดับฟอสฟอรัสที่ต่ำลงไปถึงระดับ 0.65 เปอร์เซ็นต์ Longa et al. (2000) รายงานว่าหอยแมลงภู่ (*Mytilus galloprovincialis*) ที่ได้รับแคลเซียมจากอาหารสูงสุด 80 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะมีเปลือกหนา แข็งแรง น้ำหนักตัวมากและขนาดใหญ่ สำหรับหอยที่ขาดแคลเซียมจะมีอาการผิดปรกติ มีการเติบโตช้า หรือมีอัตราการตายสูง หอยแมลงภู่ (*Dreissena polymorpha*) มีอัตราการเติบโตสูงที่สุดในน้ำที่มีระดับแคลเซียมคาร์บอเนต 32 มิลลิกรัมแคลเซียมต่อลิตร แต่แคลเซียมระดับต่ำมีผลต่ออัตราการตายของพ่อแม่

พันธุ์หอย โดยจะมีการเติบโตลดลงในน้ำที่มีระดับแคลเซียมน้อยกว่า 8.5 มิลลิกรัมแคลเซียมต่อลิตร (Hincks and Mackie, 1997)

การเติบโตของหอยหวานในทุกการทดลองพบว่ามีการเติบโตต่ำ และเกิดอาการเปลือกลอกในเกือบทุกสูตรอาหารเนื่องมาจากอัลคาลินิตี้ต่ำ และจากการใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรต์

อัลคาลินิตี้คือความสมารถในการสะเทินกรดแก่ ซึ่งค่าอัลคาลินิตี้รวมในน้ำเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงประจุรวมของไอออน หรือความเข้มข้นของไอออนต่างๆ มีสมการดังนี้

$$\text{Total Alkalinity} = [Na^+] + [K^+] + 2[Ca^{2+}] + 2[Mg^{2+}] - [Cl^-] - 2[SO_4^{2-}] + [H^+] - [OH^-] \quad ...(1)$$

อัลคาลินิตี้รวม (Total Alkalinity) หรือค่าด่างรวมในน้ำ มีหน่วยมิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร ($mgCaCO_3/l$) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงประจุรวมระหว่างแคลเซียม และคาร์บอเนตในน้ำทะเลมีผลต่ออัลคาลินิตี้เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถแตกตัวดังสมการ

$$CaCO3 \longleftrightarrow Ca^{2+} + CO_3^{2-}$$

น้ำทะเลที่มีค่าอัลคาลินิตี้ต่ำทำให้เกิดภาวะ undersaturated ในน้ำทะเลเนื่องมาจากค่า Ion Concentrated Product (ICP) หรือผลคูณของระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนกับคาร์บอเนตไอออนต่ำกว่าค่าคงที่ของ Solubility product ($K_{sp}$) ค่า ICP คำนวนได้จากสมการ

$$ICP = [Ca^{2+}][CO_3^{2-}] \quad ...(2)$$

แคลเซียมไอออนวัดได้จากเทสต์คิต ส่วนค่าคาร์บอเนตไอออนไม่สามารถวัดได้โดยตรงแต่จะได้จากการคำนวณ

คาร์บอเนตไอออนในน้ำทะเลอยู่ในรูป ไบคาร์บอเนต $[HCO_3^-]$ และคาร์บอเนตไอออน $[CO_3^{2-}]$ เป็นผลิตภัณฑ์ของกรดคาร์บอนิกซึ่งเป็นกรดอ่อน มีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเป็นกรดด่างในน้ำทะเล มีการเปลี่ยนรูปดังสมการ

$$CO_3^{2-} + H^+ \longleftrightarrow HCO_3^- \quad ...(3)$$

$$HCO_3^- + H^+ \longleftrightarrow H_2CO_3 \quad \ldots(4)$$

การจับตัวระหว่าง ไบคาร์บอเนต คาร์บอเนต และกับแคลเซียมไอออนทำให้ประจุบวกในน้ำทะเลลดลง ซึ่งอนุมานได้ว่าการเปลี่ยนแปลงประจุคาร์บอเนตมีค่าเท่ากับอัลคาลินิตี้รวม (Total Alkalinity) ในน้ำดังสมการ

$$\text{Total Alkalinity (TA)} = [HCO_3^-] + 2[CO_3^{2-}] \quad \ldots(5)$$

จากสมการที่ 3 ได้ว่าค่าคงที่การแตกตัวขั้นที่สอง $Ka_2 = \dfrac{[H^+] . [CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]}$

ได้ว่า $[HCO_3^-] = \dfrac{[H^+] . [CO_3^{2-}]}{K_2} \quad \ldots(6)$

แทนค่า $[HCO_3^-]$ ในสมการ 5 ได้ว่า

$$TA = \frac{[H^+] . [CO_3^{2-}]}{Ka_2} + 2[CO_3^{2-}]$$

$$= \frac{\{[H^+] + 2Ka_2\} . [CO_3^{2-}]}{Ka_2}$$

$$[CO_3^{2-}] = \frac{Ka_2 . TA}{[H^+] + 2Ka_2}$$

โดย $Ka = 5.61 \times 10^{-11}$ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

TA = 30 ถึง 60 $mgCaCO_3/l$ (จากการวัดด้วยเทสต์คิต) เท่ากับ $6.0 \times 10^{-6}$ ถึง $1.2 \times 10^{-5}$ eq/l

$[H^+] = 10^{-pH}$

ดังนั้นความเข้มข้นคาร์บอเนตคำนวณได้ดังนี้

$$[CO_3^{2-}] = \frac{Ka_2 \cdot TA}{[H^+] + 2Ka_2}$$

$$= \frac{(5.61 \times 10^{-11}) \cdot (1.2 \times 10^{-3})}{(10^{-7.4}) + 2(5.61 \times 10^{-11})}$$

$$= \frac{(5.61 \times 10^{-11}) \cdot (1.2 \times 10^{-3})}{(3.98 \times 10^{-8}) + (11.22 \times 10^{-11})}$$

$$= \frac{6.732 \times 10^{-14}}{3.99122 \times 10^{-8}}$$

$$= 1.69 \times 10^{-6} \text{ eq/l}$$

$$= \frac{1.69 \times 10^{-8} \times 100 \times 1000}{2}$$

$$= 0.08 \text{ mg/l}$$

คำนวณค่าอัลคาลินิตี้รวมเท่ากับ

$$\text{Total Alkalinity} = [HCO_3^-] + 2[CO_3^{2-}]$$

$$= \frac{[H^+] \cdot [CO_3^{2-}]}{Ka_2} + 2(0.08)$$

$$= \frac{(3.98 \times 10^{-8}) \cdot (0.08)}{5.61 \times 10^{-11}} + 0.16$$

$$= \frac{0.3184 \times 10^{-8}}{5.61 \times 10^{-11}} + 0.16$$

$$= 0.056 \times 10^{3} + 0.16$$

$$= 56.16 \text{ mgCaCO}_3\text{/l}$$

ค่า ICP ที่อัลคาลินิตี้รวมเท่ากับ 60 แคลเซียมไอออนเท่ากับ 120 คำนวณได้ดังนี้

$$ICP = [Ca^{2+}][CO_3^{2-}]$$

$$= (120/40{,}000 \text{ eq/l}) \times (1.69 \times 10^{-6} \text{ eq/l})$$

$$= 5.07 \times 10^{-9} \text{ eq/l}$$

ค่า ICP ในน้ำทะเลที่ใช้เลี้ยงน้อยกว่า Ksp ของแคลเซียมคาร์บอเนต (ค่า Ksp ของแคลเซียมคาร์บอเนตเท่ากับ $8.7 \times 10^{-9}$) แสดงว่าน้ำทะเลอยู่ในสภาพไม่อิ่มตัว (undersaturated seawater) จึงสามารถรับแคลเซียมไอออนได้อีก แคลเซียมบริเวณผิวเปลือกหอยที่สัมผัสน้ำทะเลจึงละลายตัวออกมาในรูปแคลเซียมไอออน ทำให้หอยเกิดอาการเปลือกลอกและมีการเติบโตต่ำ

การใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรต์ทำให้เชื้อต่างๆในน้ำทะเลหมดไป หลังจากการให้อากาศแก่น้ำทะเลในโรงที่ปิดอย่างมิดชิด เป็นเวลาหนึ่งสัปดาห์ และตรวจสอบปริมาณคลอรีนที่ตกค้างด้วยเทสต์คิต แต่แคลเซียมไฮโปคลอไรต์ที่ใส่ลงไปจะแตกตัวดังสมการ

$$Ca(OCl)_2 \longrightarrow Ca^{2+} + 2OCl^- \quad \ldots(3)$$

และในกรณีที่น้ำมีสารอินทรีย์สูง $OCl^-$ จทำปฏิกิริยากับน้ำดังสมการ

$$OCl^- + H_2O \longrightarrow 1/2Cl_2 + 2OH^- \quad \ldots(4)$$

จากการแตกตัวของไฮโปคลอไรต์ดังสมการที่ 4 ผลรวมประจุในน้ำจะลดลง เนื่องจากมีมีไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดขึ้น ทำให้ค่าอัลคาลิตี้รวมในน้ำลดลง ดังนั้นแคลเซียมไฮโปคลอไรด์มีผลทำให้ค่าอัลคาลินิตี้ลดลงต่ำกว่าปรกติ (56.16 มิลลิกรัมต่อลิตร) เมื่อใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรต์จึงควรมีการเพิ่มอัลคาลินิตี้ในน้ำทะเลด้วย

หอยหวานที่เลี้ยงในทุกสูตรอาหารในการทดลองครั้งนี้แสดงอาการเปลือกลอกเกือบทุกตัว (มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์) ในทุกสูตรอาหารหลังจากเลี้ยงไปเป็นระยะเวลา 6 เดือน ซึ่งสัดส่วนของแคลเซียมในน้ำอยู่ในช่วง 80 – 120 มิลลิกรัมแคลเซียมต่อลิตร น้ำทะเลที่ใช้สูบจากบริเวณอ่างศิลาช่วงสะพานปลาที่มีชุมชนอ่างศิลาด้วยมีค่าแคลเซียมค่อนข้างต่ำกว่าปรกติซึ่งอยู่ที่ 401.16 มิลลิกรัม

แคลเซียมต่อลิตร (10.29 มิลลิโมลต่อลิตร) น้ำทะเลอาจมีสารอินทรีย์ปริมาณสูง มีการใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรต์เตรียมน้ำทะเลที่ใช้เลี้ยง และไม่เติมแหล่งแคลเซียมอื่นเพื่อเพิ่มอัลคาลินิตี้แก่น้ำทะเล อาหารที่ใช้ก็มีแคลเซียมไม่เกิน 7% ในการให้อาหารเวลาหนึ่งเดือนหรือตลอดอายุของน้ำหนึ่งช่วงก่อนเปลี่ยนน้ำใหม่ มีการให้อาหารในปริมาณมากที่สุดในเดือนที่หกคือน้ำหนักอาหารที่ให้เฉลี่ย 500.60 กรัม มีแคลเซียมจากอาหารประมาณ 180 กรัม ซึ่งถ้าแคลเซียมคาร์บอเนตแตกตัวออกจากอาหารมาละลายในน้ำทั้งหมดจริงก็เทียบเป็นสัดส่วนน้อยมาก เพราะน้ำในระบบมีปริมาตรมากถึง 1.5 ตัน ซึ่งในความเป็นจริงแคลเซียมก็ยังมีการคงตัวอยู่ในอาหารด้วย ไม่ได้ละลายออกไปทั้งหมด จากระดับอัลคาลินิตี้ และแคลเซียมในน้ำทะเลต่ำ รวมกับน้ำทะเลอยู่ในภาวะไม่อิ่มตัว หอยหวานเกือบทั้งหมดได้รับแคลเซียมเข้าสู่ร่างกายในระดับต่ำ และสูญเสียแคลเซียมจากเปลือกไปในน้ำทะเล จึงมีอาการเปลือกลอกเกิดขึ้น และการเติบโตค่อนข้างต่ำ

การลอกเปลือกของหอยหวานที่เลี้ยงด้วยอาหารผสมสังเกตได้ว่าเปลือกส่วนนอกซึ่งอาจจะเป็นชั้น periostracum ลอกออก เพราะเป็นส่วนที่มีสีเหลืองอ่อน มีความอ่อน และบางมาก ตรงกับทฤษฎีที่ว่าเปลือกชั้น periostracum เป็นชั้นที่มีความบางที่สุดและประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่ชื่อ conchiolin (conchin) และสารประกอบกลุ่ม quinine-tanned protein (บพิธ และนัทพร, 2547) ซึ่งเป็นโปรตีน เมื่อชิ้นส่วนเปลือกชั้นนอกหลุดไป เปลือกบริเวณนั้นก็จะมีลักษณะขาว และแข็งมาก มีความเป็นไปได้ว่าจะเป็นเปลือกชั้นกลางคือ prismatic layer ในการแก้ไขควรมีการศึกษาต่อไปว่าชิ้นส่วนที่ลอกนี้เป็นสารประกอบอะไร มีความสัมพันธ์กับแคลเซียมหรือไม่ ถ้าสามารถรักษาเปลือกชั้นนอกหรือ periostracum นี้ไว้ได้ ก็จะสามารถทำให้หอยหวานไม่แสดงอาการเปลือกลอกและมีการเติบโตดีขึ้น

**5.2 สรุปผลการวิจัย**

การศึกษาผลการเสริมแคลเซียมและฟอสฟอรัสในอาหารหอยหวานระดับต่างกันในครั้งนี้สามารถสรุปว่าแคลเซียมมีผลต่อการเติบโตด้านความยาวเปลือกที่เพิ่มขึ้น น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น Weight Gain Rate และอัตราการแลกเนื้อ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ไม่มีผลต่อความกว้างเปลือกที่เพิ่มขึ้น ความยาวเปลือกที่เพิ่มขึ้นต่อวัน และอัตราการรอดสุดท้าย ส่วนฟอสฟอรัสมีผลต่อ การเติบโตด้านความยาวเปลือกที่เพิ่มขึ้น น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น และอัตราการแลกเนื้อ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ไม่มีผลต่อ Weight Gain Rate ความกว้างเปลือกที่เพิ่มขึ้น ความยาวเปลือกที่เพิ่มขึ้นต่อวัน และอัตราการรอดสุดท้าย

ในส่วนของอาหารผสมสูตรที่เสริมฟอสฟอรัส 1% จะมีอัตราการเจริญโดยความยาวเปลือก อัตราการเจริญโดยน้ำหนัก และอัตราการแลกเนื้อสูงที่สุดในทุกระดับของการเสริมแคลเซียม แต่อาหารผสมที่เสริมแคลเซียม 4% และฟอสเฟต 3% กับอาหารเสริมแคลเซียม 4% และฟอสเฟต 5% จะมีอัตราการเจริญเติบโตโดยความยาวเปลือก และอัตราการเจริญเติบโตโดยน้ำหนักต่ำที่สุด สำหรับการเสริมแคลเซียมและฟอสฟอรัสในอาหารผสมไม่มีผลต่ออัตราการรอดตายของหอหวาน โดยอาหารผสมที่เสริมฟอสเฟตในปริมาณน้อย (1%) น่าจะมีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของหอยหวาน

การเสริมแคลเซียมและฟอสฟอรัสด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต และโพแทสเซียมฟอสเฟตโมโนเบสิก ในอาหารผสมเลี้ยงหอยหวานในระบบน้ำทะเลแบบหมุนเวียน ไม่สามารถแก้ไขอาการเปลือกลอกของหอยหวานได้

**5.3 ข้อเสนอแนะ**

1. กระบวนการสร้างเปลือกประกอบด้วยแร่ธาตุอื่นๆ เช่น แบเรียม เหล็ก หรือ ซิลิก้า เป็นต้น ดังนั้นควรมีการศึกษาผลของแร่ธาตุเหล่านี้ประกอบเพื่อการแก้ไขปัญหาได้ในอนาคต

2. การทดลองครั้งนี้พบว่าหอยหวานทั้งหมด แสดงอาการเปลือกลอก ดังนั้นควรมีการศึกษาปัจจัยและกระบวนการที่ทำให้เกิดอาการเปลือกลอกอย่างละเอียด

3. การเลี้ยงในหน่วยการทดลองและใช้อาหารรูปแบบนี้ พบว่าหอยมีการเติบโตต่ำกว่าหอยหวานที่เลี้ยงด้วยเนื้อปลาสด ดังนั้นควรมีการศึกษา และพัฒนารูปแบบอาหารที่เหมาะสมต่อการกินอาหารของหอยหวาน

4. ควรมีการเติมแคลเซียมและปรับคุณภาพน้ำได้แก่แคลเซียม และอัลคาลินิตี้รวมให้เหมาะสมก่อนการทดลองเลี้ยงหอยหวาน เมื่อใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรต์กำจัดเชื้อ

5. การทดลองครั้งนี้กำหนดระดับแคลเซียม (1%, 4%, 7%) และฟอสฟอรัส (1%, 3%, 5%) ขึ้นในช่วงกว้าง และไม่ใช่ค่าความต้องการแคลเซียมและฟอสฟอรัสของหอยหวานอย่างแท้จริง ดังนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มต่อไป